

석탄광에 인접하여 굴착되는 터널의 안정성에 관한 수치해석

김종욱¹⁾, 김영근²⁾, 이정인¹⁾

¹⁾서울대학교 지구환경시스템공학부

²⁾삼보기술단

1. 서론

최근 고속도로나 고속철도의 건설, 기존 국도 및 철도의 노선개량공사 등이 추진되면서 산악지대를 통과하는 터널의 연장이 길어지고 단면도 커지고 있어 그 설계와 시공에 있어 안정성 해석이 대단히 중요하다. 특히 이 연구의 대상이 되는 영동선 동백산-도계간 철도이설 개량공사에서는 강원도 태백시 동백산에서 삼척시 도계사이의 높은 표고차를 극복하기 위하여 길이 16.3 km의 원형순환노선 장대터널이 설계되어 있다. 이 터널이 통과하는 주변 지역은 우리 나라의 무연탄 매장량 및 생산이 가장 큰 삼척탄전 지대로서 크고 작은 맥폭과 경사를 가진 많은 탄층과 폐광된 광산의 운반갱도 및 채굴적들이 많이 분포되어 있다. 이 지역에 터널을 굴착하는 경우 주위의 탄층 및 채굴공동이 터널의 응력분포와 변형거동에 미치는 영향을 조사하여 이에 대비하는 안전한 보강설계를 하는 것이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 현재 시공중인 영동선 동백산 - 도계간 철도이설 건설공사 지역을 대상으로 하여 석탄층이나 채굴적에 인접하고 있는 지질조건에서 터널을 굴착하는 경우에 탄층이나 채굴적의 위치, 지보조건 등이 터널의 역학적 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 보강조건으로는 현재 계획중인 지보방법을 사용하였다.

해석방법으로는 2차원 해석과 3차원 해석을 수행하였으며, 2차원 해석에서 우선 무지보 터널에서 석탄층과 터널과의 거리가 변함에 따른 터널의 변형거동을 살펴보고 석탄층의 영향을 벗어나는 임계거리를 알아보았다. 또한 현재 계획중인 지보패턴을 이용한 보강상태에서 터널의 변형거동을 살펴보고 추가보강에 따른 변형거동을 고찰하였다.

3차원 해석에서는 석탄층의 주향과 경사를 달리하여 모델을 구성한 후 이에 따른 터널 변형거동의 차이를 규명하고 또한 2차원 해석에서 얻은 결과와 비교하여 석탄층에 인접한 터널의 변형거동을 고찰하였다.

2. 입력변수 및 초기조건 결정

이 연구는 영동선 동백산-도계간의 불량한 선로조건과 노후화 된 구조물로 인한 열차 안전운행 저해요인을 해소하기 위하여 철도청에서 시행하는 총 연장 16.3 km인 영동선 동백산-도계간 철도 이설공사를 대상으로 하였고, 지역은 강원도 태백시 영동선 동백산역에서 강원도 삼척시 도계읍 영동선 도계역 일대의 구간이다. 또한 대상터널은 최대폭이 7.64 m, 높이는 7.80 m인 철도 단선터널이며, RMR과 Q 값으로 판단한 설계 지보패턴은 PS-4로서

1회 굴진장은 1.5 m, 록볼트의 횡간격은 1.3 m, 종간격은 1.5 m, 길이는 3 m이다. 또한 슛크리트의 두께는 12 cm 인 지보형태를 취하고 있다. 그리고 석탄층과 암반은 Mohr-Coulomb 탄소성 거동을 따르는 것으로 가정하고, 축압비는 1로 하였다. 터널은 루프구간과 수평구간으로 구분할 수 있는데, 석탄층이나 채굴적을 만날 가능성이 많은 수평구간의 터널의 심도를 지하 200 m 로 가정하였다.

표 1. Input parameters for the ground materials

Properties \ Material	Rock mass	Coal seam
Density (kg/m ³)	2400	1810
Young's modulus (GPa)	3.76	0.52
Poisson's ratio	0.24	0.26
Cohesion (MPa)	1.3	0.26
Friction angle (°)	34	26

표 2. Input parameters for the support materials

Properties \ Material	Rockbolt	Shotcrete
Density (kg/m ³)	7850	2300
Young's modulus (GPa)	200	15
Poisson's ratio	-	0.167

3. 2차원 해석

3.1. 영향 임계거리 결정 (무지보)

석탄층에 의한 터널 변형거동의 영향을 수치해석적 방법으로 고찰하기 위한 모델을 구성하기 위해서는 석탄층의 영향이 터널 변형거동에 미치게 되는 임계거리를 구하는 것이 선행되어야 한다. 사용 프로그램은 ITASCA社에서 개발한 2차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용하였다.

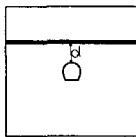
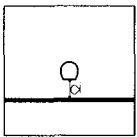
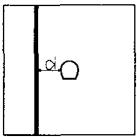
Location of coal seam	Above tunnel	Beneath tunnel	At the side of tunnel (left)
Geometry of model			

표 3. The geometry of model

석탄층과 터널과의 위치를 크게 석탄층이 터널의 상부에 존재하는 경우, 하부에 존재하

는 경우, 측면에 존재하는 경우로 구분하였다. 그리고 터널과 석탄층과의 거리는 터널 폭의 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0배의 거리로 달리하면서 터널의 천단부, 하단부, 좌우 측벽부의 변위를 고찰하여 석탄층의 영향이 없다고 판단되는 영역을 각각의 경우에 대하여 알아보았다. 또한 석탄층의 영향이 터널지보의 형태에 따라서 달라질 수 있는 점을 감안하여 석탄층이 터널거동에 미치는 영향범위 해석에서는 무지보 터널을 가정하였다. 표 3 은 해석을 수행한 모델을 나타낸 것인데 여기서 검은색으로 표시된 부분이 석탄층이다.

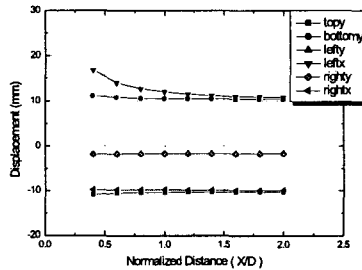
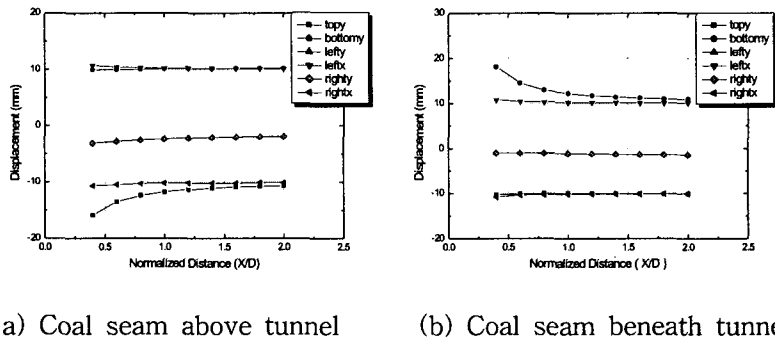


그림 1. Relationship between displacement and normalized distance

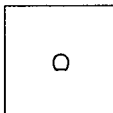
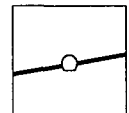
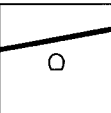
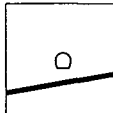
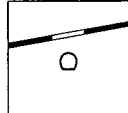

(top y: y displacement of crown, bottom y: displacement of invert, left x: x displacement of left wall, left y: y displacement of left wall, right x: x displacement of right wall, right y: y displacement of right wall, D: the maximum width of tunnel)

위의 그림 1 을 살펴보면 알 수 있듯이, 석탄층에 의해서 터널의 변형거동에 영향을 받는 영역은 다음과 같다. 즉, 석탄층이 터널의 상부에 존재하는 경우는 터널의 천단변위가 가장 많은 영향을 받고, 석탄층의 영향을 무시할 수 있는 범위는 터널의 최대 폭의 약 1.2 ~ 1.4배인 것으로 나타났다. 마찬가지로 석탄층이 터널의 하부에 존재하는 경우는 터널의 바닥 부분의 변위에, 석탄층이 터널의 좌측부분에 존재하는 경우는 터널의 좌측부분에 가장 많은 영향을 주는 것으로 나타났고, 석탄층의 영향을 무시할 수 있는 임계거리는 터널의 최대 폭의 약 1.2 ~ 1.4배로서 터널에 대한 석탄층의 상대적인 위치의 영향은 미미한 것으로 나타

났다. 따라서, 터널의 변형거동에 대한 석탄층에 영향은 터널과 석탄층과의 거리에 의존하는 것으로 나타났다.

3.2. 석탄층에 인접한 터널의 역학적 거동 해석 (PS-4)

석탄층의 존재가 터널의 변형거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 지하 200 m 하부에 굴착되는 터널을 모델로 하여, 석탄층이 존재하지 않는 경우(Case 1), 터널이 석탄층을 관통하는 경우(Case 2), 석탄층이 터널 폭만큼 상부로 이격되어 있는 경우(Case 3), 터널 폭만큼 하부로 이격되어 있는 경우(Case 4), 그리고 상부에 채굴적이 존재하는 경우(Case 5), 하부에 채굴적이 존재하는 경우(Case 6)까지 총 6가지의 경우를 해석하였다. 또한 지보타입은 PS-4를 적용하였다.

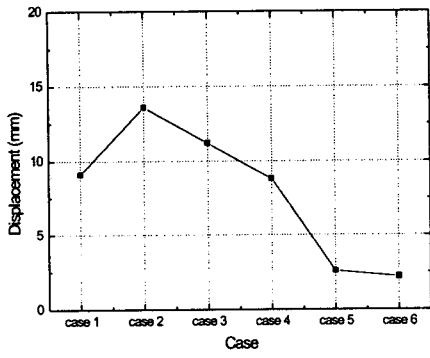
Name	Case 1	Case 2	Case 3	Case 5	Case 5	Case 6
Geometry						
Remarks	<ul style="list-style-type: none"> • Standard case • No coal seam 	<ul style="list-style-type: none"> • Coal seam intersects tunnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Distance between tunnel and coal seam : 1D 		<ul style="list-style-type: none"> • Excavated seam exists above tunnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Excavated seam exists beneath tunnel

* D: the maximum width of tunnel.

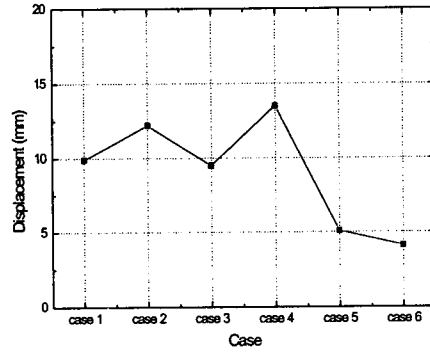
표 4. Cases of 2D numerical analysis

그림 2 는 해석결과를 정리한 것이다. 터널 천단부분의 변위는 석탄층이 터널을 관통하는 경우(Case 2)에서 13.6 mm로서 가장 큰 값을 보였다. 또한 석탄층이 상부에 존재하는 경우의 천단변위가 석탄층이 하부에 존재하는 경우(Case 4)의 천단변위보다 크다. 그러나 천단에서 Case 2의 경우가 가장 큰 변위를 보이는 것에 비하여 바닥부분의 변위는 Case 4의 경우가 13.5 mm로 가장 큰 값을 보이는데 이것은 터널의 하부는 보강이 되지 않았기 때문으로 사료된다. 이러한 결과를 통하여 석탄층이 터널을 통과하고 있는 경우가 터널의 변형거동에 가장 큰 영향을 보이고, 터널에서 같은 거리로 이격되어 있는 경우는 터널과 석탄층과의 상대적인 위치보다 터널과 석탄층과의 거리에 지배적인 영향을 받는다고 할 수 있다.

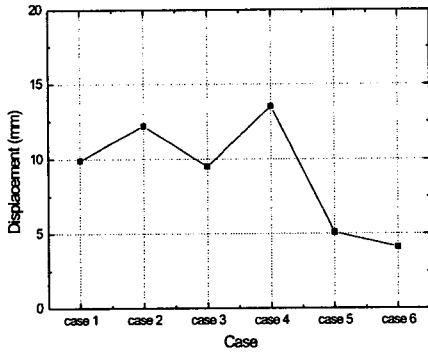
그러나 상부와 하부에 채굴적이 존재하는 경우(Case 5, 6)는 석탄층이 존재하지 않는 경우(Case 1)에 비하여 적은 변위를 나타내었고 좌우 측벽 부분에서만 12~13 mm 정도로 나타났다. 하지만 해석결과 터널 주변의 소성영역을 도시한 그림이 그림 3 인데 여기서 알 수 있듯이 다른 경우에는 터널 굴착에 의한 소성영역이 터널 주변에만 국한된 것에 반하여 Case 5와 Case 6의 경우는 터널의 소성영역이 인접한 채굴적에 의하여 확산되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 소성영역의 결과로 터널 지보재에 상대적으로 40 ~ 60 % 정도의 지보하중 증가가 나타나는 것을 알 수 있고 이에 대비한 추가적인 지보가 필요할 것으로 사료된다.



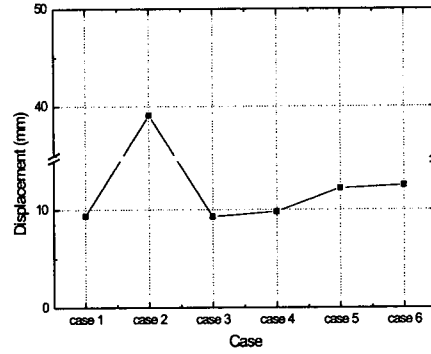
(a) y displacement at crown



(b) y displacement at invert



(c) x displacement at left wall



(d) x displacement at right wall

그림 2. Radial displacement after 2D analysis

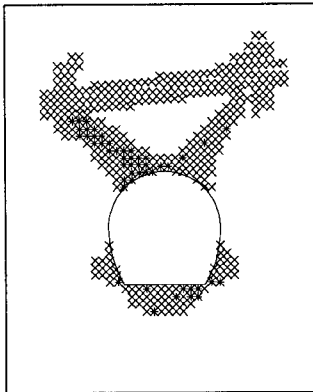


그림 2. Case 5의 소성영역

Table 4.8 Maximum radial stress of shotcrete

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Max. shotcrete radial stress (kPa)	409	*1163	418	497	692	481

* : Measuring point which meets coal seam (right wall part)

4. 3차원 해석

석탄층이 터널의 변형거동에 영향을 미치는 것을 석탄층과 터널사이의 각, 터널과 석탄층 사이의 수직거리, 터널에 대한 석탄층의 상대적인 위치 등과 같은 다양한 조건에 대하여 고찰하기 위하여 3차원 해석을 실시하였다. 초기조건과 입력변수는 2차원해석에서 사용한 것과 동일한 값을 사용하였고, 해석은 유한요소 해석기법을 이용한 에메랄드 소프트웨어(Emerald Soft)사의 PENTAGON-3D를 사용하였다.

4.1. 요소망 구성

3차원 수치해석을 위하여 터널의 폭은 7.64 m, 높이는 7.8 m인 철도 단선터널을 대상으로 모두 8개의 해석모델을 구성하였다. 표 6 에서 'intact'는 석탄층이 존재하지 않는 경우이고, 'tb30', 'tb60'는 터널 굴진중 석탄층이 상부에서 출현하여 하부로 사라지는 경우, 'bt30', 'bt60'은 하부에서부터 석탄층이 출현하여 상부로 진행되는 경우이며 'lr30', 'lr60'은 석탄층이 터널의 좌측부분에서부터 출현하면서 이후에는 우측으로 사라지는 경우이다. 'upright'는 석탄층의 경사가 90° 인 경우로서 굴진과정에서 한 막장을 진행하면 석탄층을 관통하게 되는 경우이다. 'tb30', 'tb60', 'bt30', 'bt60' 경우의 석탄층의 주향은 터널의 진행방향과 수직이며, 'lr30'의 경우는 30° , 'lr60'의 경우는 60° 이다. 석탄층의 경사가 30° 인 'tb30', 'bt30' 그리고 경사가 90° 이면서 석탄층의 주향과 터널의 진행방향과의 각이 30° 인 'lr30'에서의 석탄층의 두께는 1.36 m, 그리고 석탄층의 경사가 60° 인 'tb60', 'bt60' 그리고 경사가 90° 이면서 석탄층의 주향과 터널의 진행방향과의 각이 60° 인 'lr60'에서의 석탄층의 두께는 0.8 m이다.

Name	α^1 (°)	β^2 (°)	Thickness of coal seam (m)	Advancing (m)	Remarks
intact	-	-	-	2.7	No coal seam
tb30	90	30	1.36	2.7	From top to bottom
tb60	90	60	0.80	2.7	
bt30	90	-30	1.36	2.7	From bottom to top
bt60	90	-60	0.80	2.7	
lr30	30	90	1.36	2.7	From left to right
lr60	60	90	0.80	2.7	
upright	90	90	1.35	2.7	Upright coal seam

¹⁾ α : Angle between strike of coal seam and direction of excavation.

²⁾ β : Dip of coal seam. (downward: positive)

표 6. Eight different cases in 3D numerical analysis.

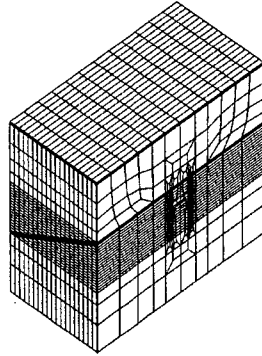
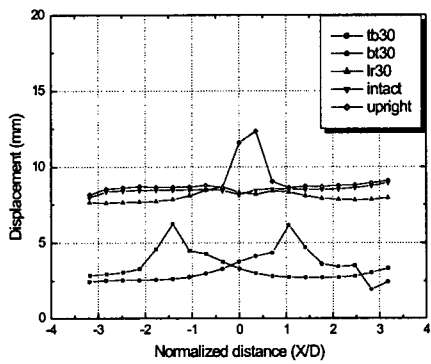
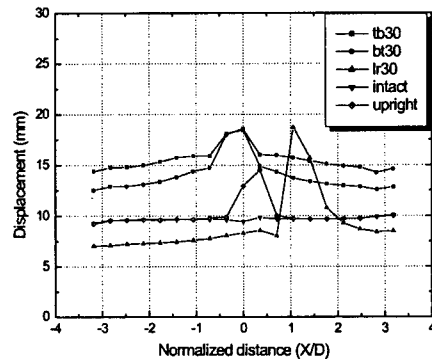


그림 4. tb30의 경우의 요소망

위의 8가지의 해석결과를 살펴보면 특정한 경향이 있는 것을 알 수 있다.

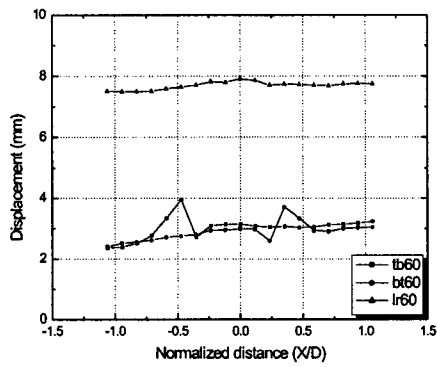


(a) 천단부분의 y방향 변위

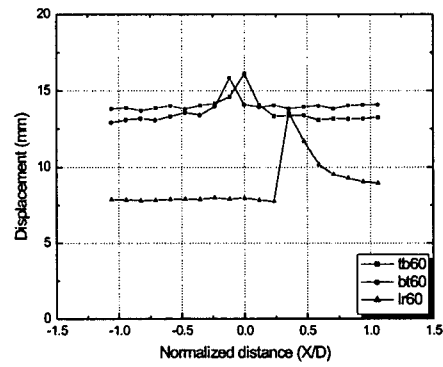


(b) 우측부분의 x방향 변위

그림 5. Radial displacement after 3-D analysis (tb30, bt30, lr30, intact, upright)



(c) 천단부분의 y방향 변위



(d) 우측부분의 x방향 변위

그림 6. Radial displacement after 3-D analysis (tb60, bt60, lr60)

종합적으로 살펴보면 터널의 진행방향과 석탄층이 이루는 각이 30° 인 tb30, bt30, lr30의 경우에는 약간의 차이는 있지만 석탄층의 영향으로 터널의 거동에 영향을 미치는 굴진방향 영역이 $1.0\sim 1.2D$ 이고, 터널진행 방향과 석탄층이 이루는 각이 60° 인 tb60, bt60, lr60의 경우에는 석탄층의 굴진방향 영향범위가 $0.3\sim 0.35D$ 정도이다.

석탄층과 터널진행방향이 이루는 각에 따라서 터널의 변형거동에 영향을 미치는 수직영역이 상이하게 나타나는 점을 감안하여 석탄층과 터널과의 수직거리로 역산하여 알아보았다.

tb30, bt30의 경우에 터널의 변위에 영향을 받는 거리인 $1.0\sim 1.2D$ 에서 터널 막장과 석탄층과의 거리를 구해보면 $0.6\sim 0.7D$ 정도이다. 또한 tb60, bt60 경우의 $0.3\sim 0.35D$ 에서 터널 막장에서 석탄층과의 수직거리는 $0.5\sim 0.6D$ 정도이다. 따라서 터널 굴진방향으로 본 영향거리는 대략 3배정도의 차이를 보이지만, 터널 단면상에서 본 석탄층과 터널 단면사이의 거리로 살펴보면 석탄층과 터널이 이루는 각이 60° 인 경우가 조금 작지만 대체적으로 $0.5\sim 0.7D$ 정도로 유사한 면을 보이고 있다. 그리고 석탄층이 터널의 변형거동에 영향을 미치는 것은 터널단면에서 석탄층과 터널과의 거리에 의존한다고 사료된다. 그림 7은 석탄층으로 인한 터널 변형거동의 영향범위를 터널 진행방향과 수직방향으로 비교한 것이다.

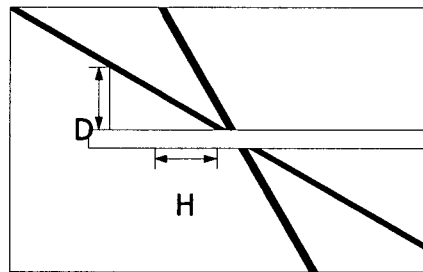


그림 7. Distance between coal seam and tunnel (D: vertical distance, H: horizontal distance)

5. 결론

이 연구에서는 삼척탄전을 통과하는 영동선 동백산-도계간 철도 장대터널 굴착공사를 대상으로 하여 인접한 석탄층과 채굴적이 터널의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 석탄층과 터널과의 상대 위치에 따른 터널의 변형거동을 분석하고 추가 보조공법을 수치해석적 방법으로 검토하였다.

2차원 해석에서는 석탄층과 채굴적이 터널의 상부 혹은 하부에 존재하는 경우와 터널이 석탄층을 관통하는 경우에 대하여 그 위치에 따른 터널의 변형거동을 해석하였다. 3차원 해석은 사차원 유한요소법 프로그램인 PENTAGON-3D를 사용하여 굴착과정에서 석탄층이 터널 상부에서 출현하여 하부로 멀어지는 경우와 하부에서 출현하여 상부로 멀어지는 경우, 그리고 좌측부분에서 출현하여 우측부분으로 멀어지는 경우, 그리고 석탄층이 터널 굴진 방향에 수직인 경우로 나누어서 각각의 거리에 따른 터널의 변형거동을 해석하였다.

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 5.1. 2차원 해석에서 터널 주변에 석탄층이 인접한 경우 석탄층에 의해서 터널의 변형거동이 영향을 받는 것은 석탄층이 터널의 상부, 하부 혹은 측면부 등의 방향에 따른 위치보다 석탄층과 터널과의 거리에 크게 의존하며 그 영향 임계거리는 터널 폭의 1.2~1.4배이다.
- 5.2. 2차원 해석에서 석탄층이 터널을 수평방향으로 관통하고 있는 경우가 터널의 상부나 하부에 터널 폭의 거리만큼 이격되어 존재하는 경우보다 약 50%정도의 추가변위를 나타내었고, 터널 바닥부의 변위는 석탄층이 터널의 하부에 터널 폭의 거리만큼 이격되어 존재하는 경우가 가장 큰 변위를 보이는 것으로 나타났다.
- 5.3. 2차원 해석에서 터널의 상부에 터널 폭의 거리만큼 이격된 석탄층과 채굴적(터널 폭의 두 배)이 동시에 존재하는 경우에는 채굴적이 존재하지 않는 경우에 비하여 넓은 소성영역이 발생하는 것으로 나타나며, 따라서 지보재에 미치는 응력이 40~60%정도 증가하는 것으로 나타났다.
- 5.4. 3차원 해석에서 석탄층과 터널이 이루는 각이 30° 인 경우에 석탄층이 터널의 상부에서 출현하여 하부로 멀어지는 경우나 하부에서 출현하여 상부로 멀어지는 경우에는 석탄층이 출현하기 전후로 굴진방향으로 터널 폭의 0.7~1.0배의 영역에서 변위증가가 나타나며, 석탄층이 좌측부분에서 출현하여 우측부분으로 멀어지는 경우에는 터널 폭의 1.0~1.2배정도로서 석탄층의 영향을 받는 영역이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 석탄층과 터널이 이루는 각이 60° 인 경우에는 상부에서 출현하여 하부로 멀어지는 경우의 그 영향범위는 터널 폭의 약 0.3~0.35배이고 좌측에서 출현하여 우측으로 사라지는 경우는 약 0.5배로 조금 증가한다.
- 5.5. 3차원 해석에서 석탄층의 영향을 받는 임계영역에서의 터널단면과 석탄층과의 거리를 살펴보면 터널 폭의 0.5~0.7배까지 영향을 받고 있다. 따라서 터널의 변형거동은 터널과 석탄층 사이의 거리에 많은 영향을 받고, 석탄층과 터널이 이루는 각이나 석탄층의 위치에 의한 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 살펴보면, 석탄광에 인접하여 터널을 굴착하는 경우는 터널 주변에 존재하는 석탄층이나 채굴적 등으로 인하여 터널의 변형거동에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났고, 또한 그 영향범위는 터널과 석탄층과의 거리, 터널과 석탄층이 이루는 각, 석탄층과 채굴적이 존재하는 위치 등에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 석탄층이 터널의 변형거동에 영향을 미치는 것을 터널단면과 석탄층 사이의 거리에 크게 의존하며, 석탄층이 터널의 상부, 하부, 측면에 위치하는 것에 의한 차이, 혹은 터널과 석탄층이 이루는 각에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Heping Xie, Zhonghui Chen, Jiachen Wang, 1999, Three-dimensional numerical analysis of deformation and failure during top coal caving, *Int. J. Rock Mechanics & Mining Science* 36 p. 651-658
2. L.R. Alejano, P. Ramirez-Oyanguren, J. Taboada, 1999, FEM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining, *Int. J. Rock Mechanics & Mining Science* 36 p. 475-491
3. 강준호, 1997, 터널의 벤치길이를 중심으로 한 설계변수에 따른 암반거동의 3차원 수치해석과 보강설계, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원
4. 김민규, 1992, 삼척탄전 석탄의 변형 및 파괴특성, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원
5. (주)대우건설, 1999, 영동선-도계간 철도이설공사 지반조사보고서